

پیش‌بینی خصوصیات پالس‌های حوزه نزدیک گسل با اعمال اثر راستاگرایی

علی حسنخانی^{۱*} و حمید زعفرانی^۲

۱. کارشناس ارشد پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران، ایران

۲. دانشیار پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله تهران، ایران

(دریافت: ۹۳/۹/۲۳، پذیرش نهایی: ۹۴/۷/۱۴)

چکیده

شناخت خصوصیات پالس‌های پریدبلند برای طراحی سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل از اهمیت زیادی برخوردار است. امروزه پی‌بردن به ویژگی‌های خاص حرکات حوزه نزدیک و آثار مخرب آن روی سازه‌ها از چالش‌های پیش‌رو برای زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله است. از مهم‌ترین آثار جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل، پالس‌های پریدبلند ناشی از اثر راستاگرایی هستند که به‌طور عمده در مؤلفه عمود بر گسل پدیدار می‌شود. شبیه‌سازی تعینی این پالس‌ها برای نواحی‌ای که از آن داده‌های کافی در دسترس نیست، نقش مهمی در تخمین آن‌ها ایفا می‌کند. برای بررسی تأثیرات پالس سرعت، مدل‌های ساده‌شده‌ای نظیر مستطیل، مثلث و سینوس ارائه شده است، اما مطالعات اخیر نشان داده است که ساده‌سازی‌های این‌چنینی در مطالعه رفتار دینامیکی سازه‌ها به نتیجه‌گیری‌های نادرست خواهد انجامید. در این تحقیق با استفاده از روش اجزای محدود- عدد موج گسسته (Finite element- Discrete wave number) برای محاسبه تابع گرین محیط لایه‌ای، پدیده لغزش گسل طی زلزله و ایجاد پالس‌های پریدبلند، بررسی عددی شده است. همچنین با فرضیات گوناگون که بتواند پارامترهای مؤثر در مدل از جمله نوع گسل، سرعت گسیختگی، بزرگای زلزله و فاصله از گسل را پوشش دهد، رکوردهای حوزه نزدیک زیادی تولید شده است و در آخر با تطبیق این رکوردها با مدل تحلیلی ارائه‌شده توسط ماورودیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۵)، پارامترهای اساسی مربوط به پالس‌های پریدبلند تجزیه و تحلیل می‌شوند. این نتایج را می‌توان برای ارائه روابط آماری کالیبراسیون پالس راستاگرایی حوزه نزدیک استفاده کرد.

واژه‌های کلیدی: پالس پریدبلند، راستاگرایی، شبیه‌سازی تعینی، عدد موج گسسته، کالیبراسیون

۱. مقدمه

دارد (هوچینگز و همکاران، ۲۰۰۷). نخستین بار در زلزله ۱۹۶۶ پارکفیلد کالیفرنیا رکورد معروفی در ایستگاه سد پاکویاما (Pakoyama) که در فاصله ۸۰ متری از شکستگی گسل قرار داشت، ثبت شد که این زمان را می‌توان مبدأ آنالیزها و بررسی‌های مدرن کمی در خصوص جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک قلمداد کرد؛ اما در حوزه مهندسی زلزله و بررسی ویژگی‌های حرکات حوزه نزدیک، برترو و همکاران (۱۹۷۸) از اولین مهندسان زلزله بودند که با مطالعه آسیب‌های وارد شده به بیمارستان اولیو ویو (Olive View) در کالیفرنیا به اثر احتمالی پالس پریدبلند در حوزه نزدیک گسل بر رفتار سازه‌ها توجه کردند (ماورودیس و پاپاجورجیو، ۲۰۰۳).

متأسفانه باید گفت که حداکثر پنجاه سال تاریخچه ثبت رکورد در سراسر دنیا برای دربرگیری همه حالات انتشار موج در محیط، نوع ساختگاه، فرایند گسیختگی روی گسل و رابطه هندسی بین ساختگاه و گسل که امکان وقوع دارند، کافی نیست. این مسئله به‌خصوص در حوزه نزدیک گسل شدیدتر احساس می‌شود. برای مثال قبل از وقوع زلزله ۱۹۹۹ چی‌چی در تایوان و زلزله ۱۹۹۹ از میت ترکیه، در سراسر دنیا تنها حدود ۲۰ رکورد ناشی از زلزله‌های با بزرگای بیش از ۷ در فاصله کمتر از ۲۰ کیلومتر از گسل وجود داشت. زلزله ترکیه ۵ رکورد و زلزله تایوان ۶۵ رکورد به این مجموعه اضافه کرد، اما تنها دو سناریوی گسیختگی گسل به دانش ما اضافه شد، در حالی که هزاران سناریوی محتمل دیگر امکان وقوع

پارامترهای مربوط به مدل را به دست آوردند (هالدرسون و همکاران، ۲۰۰۷).

در ایران نیز زعفرانی و همکاران (۱۳۸۶) از رابطه تئوری برای شبیه‌سازی پالس پرئودبلند زلزله بم در ایستگاه بم استفاده کرده‌اند و نتایج مناسبی به دست آورده‌اند. این روش همچنین توسط زعفرانی و همکاران (۲۰۰۵) برای تهیه طیف طرح ویژه ساختگاه برای سد گتوند در استان خوزستان به کار رفته است. این سد در فاصله ۵ کیلومتری گسل فشاری لهبری قرار دارد و با توجه به اهمیت حرکات حوزه نزدیک در طراحی آن، مطالعات تکمیلی برای آن ضروری بوده است؛ اما نکته مهم آن است که هیچ توصیه‌ای درباره انتخاب خصوصیات پالس در زلزله‌های متفاوت و با قرارگیری متفاوت نسبت به گسل در ادبیات فنی (حتی در سطح جهانی) موجود نیست.

هدف از این تحقیق، استفاده از نتایج شبیه‌سازی تعیینی و تجزیه و تحلیل پارامترهای مدل ذکر شده به تعداد لازم، جهت ارائه روابط آماری کالیبراسیون این پالس است. این روابط در دفاتر فنی و مهندسی کاربرد خواهد داشت و می‌توان به جای شبیه‌سازی تعیینی - که کاری پیچیده است - این روابط را با روش‌های ساده‌تر شبیه‌سازی نظیر شبیه‌سازی تصادفی ترکیب کرد.

۲.۱. معرفی پالس پرئودبلند و اثر راستاگرایی

تحقیقات اکی در ۱۹۶۶ و هسکل در ۱۹۶۹ نشان داد که تغییر مکان عرضی (عمود بر گسل) پالس گونه رکورد زلزله ۱۹۶۶ پارکفیلد کالیفرنیا، به طور دقیق با تغییر مکان عرضی حاصل از گسیختگی امتداد لغز راستگردی که از شمال به جنوب منتشر می‌شود، انطباق دارد. محققان زیادی سعی کردند دلیل حرکت پالس گونه در مؤلفه سرعت عمود بر گسل را در این رکورد تبیین کنند. از سوی دیگر این اولین رکوردی بود که توجه مهندسان را به خطر بالقوه پالس پرئودبلند روی سازه‌های نرم جلب کرد.

مطالعات جدید ماورودیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) درباره تعداد زیادی از رکوردهای حوزه نزدیک، رابطه ریاضی برای شکل پالس سرعت ارائه کرده است که به دلیل سادگی و دقت بالا مورد توجه قرار گرفته است، اما به دلیل کم بودن تعداد رکوردهای ثبت شده در حوزه نزدیک، امکان کالیبره کردن و تعیین پارامترهای این مدل با انحراف معیار منطقی وجود ندارد.

آنالیز کمی پارامترهای پالس‌های سرعت همواره مورد توجه متخصصان زلزله بوده است. دیرای و رودریگوز-مارک (۲۰۰۴) در پژوهشی نسبت مقادیر پرئود (Tv) و PGV (Peak Ground Velocity) پالس‌های سرعت تعدادی از رکوردهای ثبت شده حوزه نزدیک گسل را در دو مؤلفه عمود و موازی گسل، ارزیابی آماری کردند.

ماورودیس و پاپاجورجیو با بررسی فشرده تقریباً همه رکوردهای معروف حوزه نزدیک، رابطه‌ای ریاضی برای شکل پالس سرعت ارائه کردند که به دلیل سادگی کاربرد و دقت مناسب کاربردهای بسیاری پیدا کرده است. در این مدل که با کمک تعداد زیادی از رکوردهای حوزه نزدیک کالیبره شده است، همه ورودی‌ها دارای معنای فیزیکی واضح است. آنان نشان داده‌اند که ویژگی‌های اصلی پالس‌های سرعت میدان نزدیک را می‌توان با چهار پارامتر مدت دوام پالس، مقدار دامنه پالس، تعداد و فاز نیم‌چرخه‌های آن بیان کرد (ماورودیس و پاپاجورجیو، ۲۰۰۳). این مدل را به راحتی و در ترکیب با روش‌های رایج شبیه‌سازی برای تولید حرکت کامل زمین در ساختگاه‌های واقع در نزدیک گسل می‌توان به کار برد، اما هیچ اطلاعاتی در مورد خصوصیات این پارامترهای چهارگانه داده نشده است. به دلیل کمی تعداد رکوردهای حوزه نزدیک موجود در دنیا، امکان کالیبره کردن آن‌ها با انحراف معیار منطقی وجود ندارد. هالدرسون و همکاران (۲۰۰۷) با شناسایی رکوردهای ثبت شده در ایستگاه‌های واقع در نواحی حوزه نزدیک گسل جنوب ایسلند، آن‌ها را با مدل ریاضی ماورودیس و پاپاجورجیو تطابق دادند و

روش‌های تعینی (deterministic) در فرکانس‌های پایین، تصادفی (stochastic) در فرکانس‌های بالا و ترکیبی (Broad Band) تقسیم می‌شوند.

روش‌های تعینی اولین بار توسط اکی در سال ۱۹۶۸ و هسکل در سال ۱۹۶۹ برای بازتولید پالس تغییر مکان پریودبلند رکورد سد پاکویاما در زلزله پارکفیلد کالیفرنیا (۱۹۶۶) به کار رفت. این روش از اصول مکانیک محیط‌های پیوسته و قضیه معرف، برای توصیف پدیده گسیختگی روی گسل بهره می‌گیرد. از انواع روش‌های تعینی می‌توان به دو روش اجزای محدود (Finite Element) و تفاضل‌های محدود (Finite Differences) اشاره کرد. برای کاربرد این مدل‌ها، به توزیع لغزش روی سطح گسل و اطلاعات کاملی از محیط انتشار موج نیاز داریم.

به دلیل فقدان اطلاعات از جزئیات فرایند گسیختگی چشمه لرزه‌زا و محیط انتشار موج، این روش‌ها تاکنون برای فرکانس‌هایی تا حدود ۳ هرتز استفاده شده‌اند. با توجه به مطالعات گسترده درباره جنبش نیرومند زمین به طور کلی می‌توان گفت که پارامترهای مختلف جنبش نیرومند زمین به شدت تحت تأثیر پارامترهای سینماتیکی چشمه مثل مقدار لغزش، سرعت گسیختگی، توزیع لغزش و تابع زمانی چشمه هستند؛ هرچند محدوده تغییرات پارامترهای سینماتیکی معمولاً به وسیله قوانین حاکم بر دینامیک چشمه کنترل می‌شود، تغییرپذیری پارامترهای سینماتیکی چشمه و تفسیر آن در انتخاب و طراحی سناریوی گسل نقش عمده‌ای ایفا می‌کنند (آمری و همکاران، ۲۰۱۱).

یکی از روش‌های شبیه‌سازی که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از متخصصان قرار گرفته است، روش اجزای محدود - عدد موج گسسته است. این روش را اولین بار اولسن و همکاران (۱۹۸۴) ارائه کرده‌اند و اسپودیچ و زو (۲۰۰۲) به تصحیح و بازنگری آن پرداخته‌اند. کالتررا و همکاران (۲۰۱۰) از این روش برای شبیه‌سازی زلزله ایرپینیا ایتالیا (۱۹۸۰) استفاده کرده‌اند.

البته بعد از زلزله ۱۹۹۴ نورث‌ریج و خسارت‌های شدید آن بود که توجه همگانی مهندسان زلزله به این موضوع جلب و گام‌های اساسی در ایجاد روش‌های مناسب برای طراحی سازه‌های مقاوم در برابر این پالس‌ها برداشته شد. به تدریج با رشد تعداد رکوردهای ثبت شده و پیشرفت مطالعات شبیه‌سازی، شناخت دقیق‌تری از ماهیت این پالس و خصوصیات آن حاصل شد. به طور کلی دو عامل اصلی ایجاد پالس پریود بلند سرعت که در رکوردهای حوزه نزدیک دیده می‌شود، راستاگرایی مستقیم (Forward directivity) و جابه‌جایی ماندگار (Permanent displacement or fling effect) است.

رستاگرایی مستقیم زمانی روی می‌دهد که جهت حرکت جبهه گسیختگی گسل در راستای انتشار امواج برشی گسیل شده به سمت ساختگاه باشد. در این حالت اغلب انرژی الاستیک زلزله در این جهت، در قالب یک پالس پریودبلند در ابتدای رکورد به ساختگاه می‌رسد. هنگامی که جهت لغزش روی گسل نیز به سمت ساختگاه باشد، این پدیده شدت بیشتری می‌گیرد.

تأثیرات رستاگرایی در مقدار انرژی امواج حاصل از جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک بر همه زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله آشکار است. به جرئت می‌توان اظهار کرد که اثر رستاگرایی از اصلی‌ترین عوامل تفاوت‌های موجود در اشکال امواج در نواحی نزدیک گسل بانواحی دور از گسل است. متأسفانه روابط کاهندگی موجود به هیچ وجه قابلیت پردازش و لحاظ کردن این پدیده را ندارند؛ بنابراین ارائه روابط آماری برای پیش‌بینی صحیح این پدیده در نواحی نزدیک گسل از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (چیوکارلی و ایرولینو، ۲۰۱۰).

۲. روش پژوهش

۱.۲. روش شبیه‌سازی

روش‌های شبیه‌سازی از یک دیدگاه به سه دسته اصلی

مربوطه با روش گفته شده شبیه‌سازی شده است. مقایسه این پالس با رکورد واقعی حاصل از زلزله، ثبت شده در ایستگاه EL06، در مؤلفه عمود بر گسل تطابق بسیار خوبی را نشان می‌دهد که در شکل ۱ این همخوانی قابل مشاهده است. برای تشریح بیشتر شکل ۱ و دلیل اختلافات جزئی موارد زیر قابل ذکر است.

- نمودار آبی‌رنگ: این پالس حاصل از روش اجزای محدود-عدد موج گسسته است که فیلتر باتروورث (Butter worth) بر آن اعمال شده است.

- نمودار سبزرنگ: این پالس با داده‌های حاصل از پایگاه داده‌ای پیر (Peer) به دست آمده است که این داده‌ها حاوی فیلتر باتروورث نیست. این پالس پایه مقایسه ماست و تنها تفاوت آن با رکورد واقعی موجود در مرجع این است که در مرجع ذکر شده $PGV = 86m/s$ است، اما در این نمودار این عدد حدود ۱۰۰ است که این تفاوت می‌تواند به علت نوع فیلتر اعمال شده روی داده‌ها باشد.

- نمودار قرمز رنگ: روی داده‌های حاصل از پایگاه داده‌ای Peer فیلتر باتروورث مربوط را اعمال کردیم که حاصل آن پالس قرمز رنگ است. این پالس با رکورد موجود در مرجع ذکر شده تطابق کاملی دارد و حتی در مقدار PGV تفاوت چندانی مشاهده نمی‌شود.

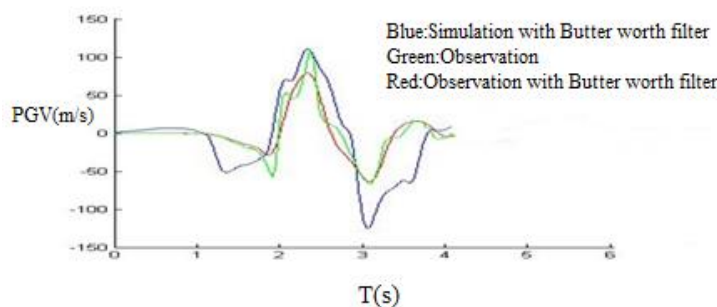
شایان ذکر است که همچنین مقدار PGVهای به دست آمده از رکوردهای شبیه‌سازی شده توسط این روش، در شرایط مختلف هندسی و ساختگاهی با روابط کاهندگی معروف موجود مانند بور و اتکینسون (۲۰۰۸) و کمپبل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸) همخوانی مطلوبی دارد.

این روش تاریخچه‌های زمانی جابه‌جایی و سرعت را در بازه فرکانسی پایین (محدوده بین صفر تا ۲ هرتز) با در نظر گرفتن تعداد وسیعی از پارامترهای سینماتیک مربوط به چشمه مورد نظر و شرایط مختلف هندسی و ساختگاهی گسل شبیه‌سازی می‌کند (آمری و همکاران، ۲۰۰۹؛ اسپودیچ و همکاران، ۲۰۰۸).

روش‌های اجزای محدود، اجزای مرزی و المان مرزی هم که قادر است هندسه و خصوصیات سه‌بعدی محیط را نیز لحاظ کند، استفاده شده است. با توجه به حجم زیاد محاسبات و نیز ناشناخته بودن خصوصیات سه‌بعدی لایه‌ها، این مدل‌ها تاکنون به نواحی‌ای مانند دره کالیفرنیا محدود شده است. در سایر نقاط بیشتر روش‌هایی که خصوصیات لایه‌ای مدل پوسته را لحاظ می‌کند، استفاده شده است. این روش قادر است رکوردهای مختلف را با در نظر گرفتن شرایط مختلف هندسی و ساختگاهی در حوزه نزدیک گسل شبیه‌سازی کند. در این صورت، پالس‌های پریود بلند حاصل از این روش مجموعه ارزشمندی برای تجزیه و تحلیل در اختیار محققان قرار می‌دهد.

همچنین این روش به تازگی توسط زعفرانی و همکاران (۲۰۱۲ و ۲۰۱۳) برای شبیه‌سازی حرکات حوزه نزدیک ناشی از فعالیت گسل شمال تهران استفاده شده است.

جهت اطمینان از صحت عملکرد روش با استفاده از اطلاعات مدل سرعت و شرایط هندسی-ساختاری گسل مربوط به زلزله امپریال ولی (Imperial Valley) کالیفرنیا ۱۹۷۹ با بزرگای ۶/۶ (هارتزل و هیتون، ۱۹۸۳) پالس



شکل ۱. مقایسه پالس سرعت حاصل از شبیه‌سازی با رکورد ثبت شده از زلزله امپریال ولی (Imperial Valley).

۳. اندازه‌گیری، مشاهده و محاسبه

۳.۱. پایگاه داده‌ای پالس‌های شبیه‌سازی شده و خصوصیات

داده‌ها

در ادامه پس از اطمینان از تشابه رکوردهای حاصل از روش شبیه‌سازی مورد نظر با رکوردهای واقعی حوزه نزدیک موجود و باتوجه به نیاز ما به یک شبکه گسترده داده‌ای، شرایط متفاوت هندسی و گسیختگی با هدف پوشش کامل شرایط مختلف لرزه‌ای در نظر گرفته شد.

۳.۱.۱. مدل سرعت

اولین قدم در شبیه‌سازی‌ها انتخاب یک مدل لایه‌ای سرعت مناسب است. فرانکل (۲۰۰۹) با در نظر گرفتن مدل لایه‌ای سرعت ارائه‌شده بور و جوینر (۱۹۹۷) و جداسازی لایه بالای این مدل به سه لایه زمین‌شناسی، مدل لایه‌ای سرعت عمومی را برای منطقه کالیفرنیا ارائه کرد که به دلیل معتبر بودن این مدل، ما نیز در شبیه‌سازی‌ها از این مدل استفاده کرده‌ایم. لایه‌های مختلف زمین‌شناسی و خصوصیات مربوط به هر لایه در مدل لایه‌ای سرعت انتخاب شده برای تولید پالس‌های سرعت در جدول ۱ نشان داده شده است.

نکته: با فرض اینکه کانون زلزله‌ها در پایین‌ترین نقطه عمق گسل مربوطه در نظر گرفته شده است، مقدار سرعت موج برشی، مقدار میانگین آن برای عمق لایه

لرزه‌زا - حدود ۳۶۰۰ متر بر ثانیه - فرض شده است.

۳.۱.۳. بزرگای رویدادها

پس از انتخاب منطقه کالیفرنیا برای اجرای شبیه‌سازی‌ها و مطالعه تحقیقاتی صورت گرفته برای زلزله‌های حوزه نزدیک ثبت شده در این منطقه سه بزرگای ۶/۵، ۷ و ۷/۵ را برای تولید رکوردهای شبیه‌سازی در نظر گرفتیم. گسل فرض شده را در عمق یک کیلومتری از سطح زمین قرار داده‌ایم ($Z_{top} = 1 \text{ Km}$).

۳.۱.۳. هندسه گسل

برای تعیین مختصات گسل جهت مثبت محور X را شمال جغرافیایی، جهت مثبت محور Y را جهت شرق و جهت محور Z را راستای عمق گسل در نظر می‌گیریم؛ بنابراین مقدار استرایک (Strike) گسل صفر تعیین می‌شود.

جهت پوشش شرایط هندسی مختلف، شیب گسل (Dip) زوایای ۴۵ درجه و ۹۰ درجه انتخاب شده‌اند.

با مطالعه منطقه کالیفرنیا دریافتیم که اغلب سازوکار گسل‌های این ناحیه امتداد لغز یا معکوس است؛ بنابراین هر دو سازوکار را لحاظ کردیم. با توجه به شرایط متنوع گفته شده در بالا و با استفاده از روابط معتبر ولز و کوپراشمیت (۱۹۹۴) مساحت صفحه گسل را در شرایط مذکور محاسبه کرده‌ایم.

جدول ۱. مدل لایه‌ای سرعت برای منطقه کالیفرنیا، استفاده شده در شبیه‌سازی‌ها (فرانکل، ۲۰۰۹).

مختصات بالای لایه (m)	سرعت موج P (m/s)	سرعت موج S (m/s)	چگالی (Kg/m^3)	ضریب کاهندگی موج P	ضریب کاهندگی موج S
۰	۱۹۰۰	۱۰۰۰	۲۱۰۰	۵۰	۲۵
۱۰۰	۲۶۰۰	۱۶۰۰	۲۱۰۰	۵۰	۲۵
۲۰۰	۳۳۰۰	۱۹۰۰	۲۱۰۰	۲۰۰	۱۰۰
۳۰۰	۴۰۰۰	۲۰۰۰	۲۴۰۰	۲۰۰	۱۰۰
۱۳۰۰	۵۵۰۰	۳۲۰۰	۲۷۰۰	۴۰۰	۲۰۰
۲۸۰۰	۶۳۰۰	۳۶۰۰	۲۸۰۰	۴۰۰	۲۰۰
۱۸۰۰۰	۶۸۰۰	۳۹۰۰	۲۹۰۰	۴۰۰	۲۰۰
۳۰۰۰۰	۷۸۰۰	۴۵۰۰	۳۳۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰۰
۱۳۰۰۰۰	۷۸۰۰	۴۵۰۰	۳۳۰۰	۹۹۹۹	۹۹۹۹

جدول ۲. نتایج به دست آمده از روابط ولز کوپراشمیت (۱۹۹۴) در تعیین مساحت صفحه گسل.

عرض گسل (Km)	طول گسل (Km)	سازوکار گسل	بزرگای زلزله
۱۰	۳۰	امتدادلغز	۶/۵
۱۲	۲۴	معکوس	۶/۵
۱۴	۶۰	امتدادلغز	۷
۱۸	۴۵	معکوس	۷
۱۸	۱۲۰	امتدادلغز	۷/۵
۳۰	۸۶	معکوس	۷/۵

۳.۱.۴. سرعت گسیختگی

برای پوشش کامل شرایط مختلف گسیختگی، مقدار سرعت گسیختگی روی گسل β ، β ، β ، β ، β و β لحاظ شده است که بتا (β) مقدار متوسط سرعت موج برشی در محیط و عدد مربوط به آن حدود ۳۶۰۰ متر بر ثانیه است.

۳.۱.۵. چیدمان ایستگاهی در اطراف گسل

در ادبیات فنی مدل‌های مختلفی برای چیدمان ایستگاه‌های دریافت‌کننده لرزه‌نگاشت‌ها در اطراف گسل پیشنهاد شده است. به عنوان مثال فرانکل (۲۰۰۹) در شبیه‌سازی‌های خود از مدل دایره‌ای استفاده کرده است؛ بدین ترتیب که ایستگاه‌ها به صورت شعاعی در اطراف گسل مربوطه در فواصل تصاعدی قرار بگیرند. همچنین پیتارکا و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه خود برای بررسی تفاوت بین حرکت زلزله ناشی از گسل‌های مدفون و گسل‌هایی که گسیختگی آن‌ها به سطح می‌رسد، برای شبیه‌سازی‌های عددی خود، گسل‌هایی با طول‌های متفاوت در نظر گرفتند و ایستگاه‌های دریافت‌کننده

رکوردها را در فواصل گوناگون از گسل قرار دادند. با بهره‌گیری از مدل‌های گوناگون ۱۲ ایستگاه در فواصل معین (۱ و ۵ و ۱۰ و ۱۲ کیلومتر) در اطراف گسل تعبیه شده و برای هر ایستگاه فاصله جونیورور از گسل مربوطه در شرایط مختلف هندسی گسل محاسبه شده است. شکل ۲ شمای کلی از نحوه قرارگیری گسل و ایستگاه‌ها را در محورهای مختصات مفروض نمایش می‌دهد.

همان‌طور که پیشتر اشاره کردیم گسل را در عمق یک کیلومتری از سطح زمین در نظر گرفته‌ایم. دو کانون برای شروع گسیختگی در صفحه گسل لحاظ شده است. با توجه به شکل ۲ یک کانون در ابتدای صفحه گسل و عمیق‌ترین نقطه (X_{min}, Y, Z_{max}) و کانون دیگر در نقطه میانی طول گسل و عمیق‌ترین نقطه (X_{ave}, Y, Z_{max}) فرض شده است.

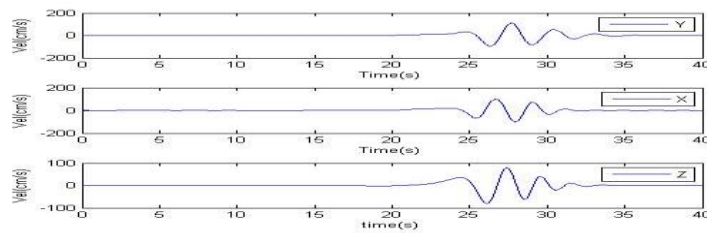
به عنوان مثال برای گسل به طول ۳۰ کیلومتر و عرض ۱۲ کیلومتر و زاویه شیب ۹۰ درجه، مختصات کانون اول (۰، ۰، ۱۲۰۰۰) و مختصات کانون دوم (۱۵۰۰۰، ۰، ۱۲۰۰۰) در نظر گرفته شده است.

۳.۱.۶. زمان خیزش گسیختگی برای تابع زمانی چشمه تا به حال مدل‌های مختلفی برای بیان تابع زمانی چشمه هنگام رویداد زلزله ارائه شده‌اند. این مدل‌ها شامل مدل ضربه‌ای، مدل چهار گوش، مدل مثلثی، مدل دوزنقه، مدل گوسی و... هستند که در این پژوهش از مدل مثلثی استفاده شده است.

با بهره‌گیری از رابطه سامرویلا و همکاران (۱۹۹۹) زمان خیزش برای زلزله‌های به بزرگای ۶/۵، ۷ و ۷/۵ به ترتیب ۰/۸، ۱/۴ و ۲/۵ ثانیه به دست آمده است.



شکل ۲. شمای کلی از نحوه قرارگیری محورهای مختصات، صفحه گسل و ایستگاه‌ها.



شکل ۳. پالس شبیه‌سازی شده برای زلزله با بزرگای ۷، برای گسل امتدادلغز، با سرعت گسیختگی $\beta = 0.7$ ، $Dip = 45^\circ$ ، برای نقطه کانونی اول، در ایستگاهی به فاصله جویتر- بور ۰ کیلومتر از گسل (انتهای گسل)، لغزش ثابت.

بیشتری دارد، ناحیه اسپریتی (حدود ۲۲ درصد از سطح گسل) و نواحی دیگر، ناحیه باقیمانده فرض می‌شوند (سامرویلا و همکاران، ۱۹۹۹).

حال با در نظر گرفتن ویژگی‌های بالا، جامعه آماری قابل اطمینانی از رکوردهای شبیه‌سازی شده برای استخراج پارامترهای مدل پالس در اختیار داریم که در شکل ۳ یک نمونه از این رکوردها نمایش داده شده است. شایان ذکر است که با توجه به گستردگی داده‌ها و پوشش تقریباً جامع تمام شرایط (برای هر بزرگا ۸۶۴ پالس شبیه‌سازی شده)، نمودارهای مربوط به پالس سرعت شبیه‌سازی شده از این روش نیز در سه مؤلفه موازی با گسل (FP)، نرمال (FN) و عمودی (UP) قابل ارائه است.

۴. بحث

۱.۴. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی با روابط کاهندگی

معتبر

با در نظر گرفتن شرایط متنوع ذکر شده، ۳۴۵۶ لرزه‌نگاشت سرعت، در دو مؤلفه عمود بر گسل (FN) و (FP) موازی با گسل به دست آمد که با در نظر گرفتن مؤلفه با بیشترین سرعت (PGV)، ۱۷۲۸ لرزه‌نگاشت تجزیه و تحلیل و بررسی خواهند شد.

جهت صحت‌سنجی نتایج حاصل از لرزه‌نگاشت‌های شبیه‌سازی شده، نتایج شبیه‌سازی‌ها را در دو گروه لغزش ثابت و لغزش متغیر با دو رابطه کاهندگی بور و اتکینسون (۲۰۰۸) و کمپبل و بزرگ‌نیا (۲۰۰۸) مقایسه کرده‌ایم که در ادبیات فنی پیش‌بینی جنبش نیرومند زمین به‌ویژه در

۷.۱.۳. نحوه توزیع لغزش در صفحه گسل

برای توزیع لغزش در صفحه گسل هنگام وقوع زلزله می‌توان مقدار متوسطی را در نظر گرفت؛ بدین معنا که لغزش به صورت یکنواخت در تمام صفحه گسل پخش می‌شود. اما همان‌طور که می‌دانیم، در شرایط واقعی هنگام وقوع زلزله، مقدار لغزش در تمام صفحه گسل یکنواخت نیست. این مقدار بسته به فاصله از کانون گسیختگی، شرایط زمین‌شناسی و... متغیر است. ما نیز در این تحقیق برای نزدیک‌تر شدن هرچه بیشتر به شرایط واقعی دو حالت برای توزیع لغزش در نظر گرفته‌ایم.

۱.۷.۱.۳. لغزش ثابت

می‌توان با در نظر گرفتن بزرگای رخداد مورد نظر و مساحت صفحه گسل و با استفاده از رابطه مشهور نرخ ممان لرزه‌ای، مقدار متوسط لغزش را در صفحه گسل مشخص کرد.

۲.۷.۱.۳. لغزش متغیر

برای محاسبه توزیع لغزش در صفحه گسل از مدل K^{-2} (عدد موج مجذور) استفاده کرده‌ایم که هررو و برنارد (۱۹۹۴) ارائه و گالوویک و براکسوا (۲۰۰۴) بازبینی و اصلاح کرده‌اند.

از دیدگاه نظری اساس این روش، در نظر گرفتن نواحی اسپریتی (Asperity) و باقیمانده (Residual) در گسل است. سامرویلا و همکاران (۱۹۹۹) رابطه‌ای تجربی برای محاسبه این نواحی ارائه داده‌اند. بدین ترتیب که بخشی از گسل را که به کانون گسیختگی نزدیکی

که در آن، A (cm) دامنه پالس ($A > 0$)، f_p (Hz) فرکانس غالب پالس ($f_p = 1 / T_p$)، t (s) متغیر زمان ($t < N/2f_p$)، N پارامتر نوسانی پالس که بیانگر تعداد نیم چرخش های پالس است ($1 < N < 3$) و v (Rad) پارامتر مربوط به زاویه فاز پالس است (به عنوان مثال $v = 0$ سیگنال متقارن و $v = \pm\pi/2$ سیگنال پادمقارن را نشان می دهد).

در شکل ۵ نمونه ای از تطابق پالس پریدوبلند شبیه سازی شده با رابطه ریاضی ماورودیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) و استخراج پارامترهای مورد نظر معادله مذکور، مشاهده می شود.

۳.۴. ارائه روابط آماری کالیبراسیون برای پیش بینی پارامترهای مؤثر پالس های پریدوبلند و صحت سنجی روابط

ارائه روابط آماری برای پیش بینی این پارامترها در تولید سازه های مقاوم در مقابل آثار تخریبی جنبش نیرومند زمین در نواحی نزدیک گسل، از اهمیت بسیاری میان مهندسان سازه برخوردار است.

تاکنون تلاش هایی برای ارائه روابط آماری از این دست انجام شده است، اما تقریباً در تمامی موارد به علت در دست نبودن جامعه آماری وسیعی از داده های مورد نیاز (به دلیل محدودیت تعداد رکوردهای واقعی حوزه نزدیک گسل)، ارائه روابط کالیبراسیون با دقت بالا امکان پذیر نبوده است. ابتدا داده های مربوط به هر پارامتر با بزرگای گشتاوری زلزله برازش داده و روابط مربوطه محاسبه شده است. در ادامه از آنجا که از ابتدای کار هدف ما توسعه روابط کاهندگی بود که با تعداد قابل قبولی از داده های مورد بررسی کالیبره شده باشند و از همه مهم تر توانایی لحاظ کردن پدیده مهم راستاگرایی را داشته باشند (قابلیتی که روابط کاهندگی امروزی از محاسبه آن عاجزند)، نیاز است علاوه بر تأثیر بزرگای، اثر فاصله ایستگاه ها از گسل مسبب (فاصله جویئر-بور) لحاظ شود؛ بنابراین مقادیر پارامترهای به دست آمده از پالس های شبیه سازی شده با استفاده از فرم اصلی رابطه کاهندگی اکار و بومر (۲۰۱۰) برازش داده شده است؛ با

ناحیه کالیفرنیا از اعتبار زیادی برخوردارند. در شکل ۴ نمونه ای از این مقایسه برای بزرگای ۶/۵ ارائه شده است. در شکل ۴ پراکندگی مناسب داده های شبیه سازی شده در مقایسه با مقادیر حاصل از روابط کاهندگی معتبر، قابل رؤیت است.

در رابطه کمپبل و بزرگ نیا مقادیر V_{s30} (سرعت موج برشی در لایه ۳۰ متری) و عمق لایه با سرعت موج برشی ۲/۵ کیلومتر بر ثانیه (عمق لایه رسوبی)، با توجه به مدل لایه ای سرعت فرانکل (۲۰۰۹) به ترتیب ۱۰۰۰ متر بر ثانیه و ۷۵۰ متر لحاظ شده است. همچنین عمق بالای گسل ۱ کیلومتر و فواصل جویئر-بور و گسیختگی با در نظر گرفتن هندسه گسل، محاسبه گردیده است.

۲.۴. ارائه مدل ریاضی برای بیان پالس حاصل از جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل

برای بیان جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک مدل های تحلیلی زیادی ارائه شده اند. این مدل ها باید خصوصیات کمی و کیفی پالس حاصل از جنبش نیرومند زمین را به خوبی توصیف کنند.

مدل تحلیلی زیر در سال ۲۰۰۳ توسط ماورودیس و پاپاجورجیو برای شبیه سازی پالس پریدوبلند در حوزه نزدیک ارائه شده است که تمام ویژگی های لازم برای یک مدل مناسب را داراست. این مدل توسط تعداد زیادی از رکوردهای واقعی موجود برای جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل بیان شده است. تاریخچه های زمانی واقعی موجود مربوط به جابه جایی، سرعت و در اکثر موارد شتاب و نیز ویژگی های طیفی سرعت و شتاب را با موفقیت شبیه سازی کرده است. تشابه زیاد با رکوردهای واقعی و ارائه پارامترهای اساسی در بررسی پالس های پریدوبلند در تسهیل مطالعه سازه هایی که در معرض تحرکات لرزه ای حوزه نزدیک هستند، بسیار حائز اهمیت است.

عبارت ریاضی این مدل به صورت رابطه (۱) بیان می شود (ماورودیس و پاپاجورجیو ۲۰۰۳):

$$V(t) = A/2 [1 + \text{Cos}(2\pi f_p t/N)] \text{Cos}(2\pi f_p t + v) \quad (1)$$

این تفاوت که ضرایب مربوط به سازوکار گسل (F) و نوع خاک (S) دخالت داده نشده است. ثابت یا لغزش متغیر) چهار رابطه (۲)، (۳)، (۴) و (۵) به دست آمده است که در موقعیت‌های متفاوت می‌توان از آن‌ها بهره جست:

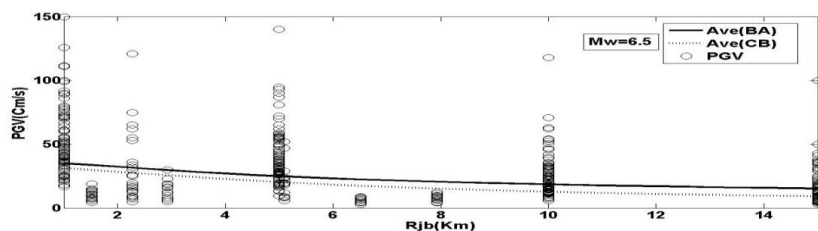
۱.۳.۴. روابط مربوط به پریود غالب پالس

برای محاسبه پریود غالب پالس در شرایط مختلف (لغزش ثابت) (۲) لغزش ثابت) $\text{Log}(T_p) = 0.151M_w - 0.546$

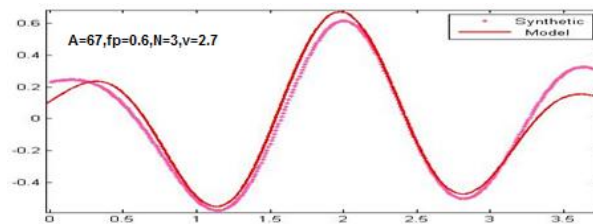
(۳) لغزش ثابت) $\text{Log}(T_p) = -1.29 + 1.46M_w - 0.154 (M_w^2) + (-4.213 + 0.53 M_w) \log_{10} (R_{jb}^2 + 41^2)^{1/2}$

(۴) لغزش متغیر) $\text{Log}(T_p) = 0.111M_w - 0.285$

(۵) لغزش متغیر) $\text{Log}(T_p) = -5.1 + 1.4M_w - 0.085 (M_w^2) + (0.46 + 0.058 M_w) \log_{10} (R_{jb}^2 + 1.6^2)^{1/2}$



شکل ۴. مقایسه مقادیر PGV رکوردهای شبیه‌سازی شده (بزرگای ۶/۵ و توزیع لغزش ثابت) با روابط کاهندگی معتبر.



شکل ۵. تطابق پالس پریود بلند مؤلفه FN (عمود بر گسل) شکل ۳ با مدل ریاضی (مقدار تطابق ۹۸ درصد).

رکوردهای واقعی ثبت شده، از دقت کافی (به خصوص در بزرگای بالا) برخوردار نباشند. به عنوان مثال در مطالعه ماورودیس و پاپاجورجیو تنها یک رکورد با بزرگای گشتاوری بیشتر ۷/۵ بررسی شده است.

از بین رکوردهای واقعی ثبت شده مورد بررسی ماورودیس و پاپاجورجیو (حدود ۲۰ رکورد)، نیز رکوردهایی وجود دارند که طول پالس پریود بلندشان با مقداری که از رابطه ارائه شده توسط ایشان به دست می‌آید، کاملاً مغایرت دارد؛ به عنوان مثال برای زلزله بخارست رومانی (۱۹۷۷) با بزرگای ۷/۳، طول پالس سرعت به دست آمده از ایستگاه BRI (۲/۱ ثانیه)، حدوداً کمتر از نصف مقداری است که از رابطه ارائه شده به دست می‌آید. همچنین پالس‌های سرعت مربوط به دو زلزله وایترونوز کالیفرنیا (۱۹۸۷) با بزرگای ۵/۹ و زلزله آیون یونان (۱۹۹۵) با بزرگای ۶/۳ دوره‌های کوتاه‌تری

در ادبیات فنی زلزله‌شناسی تاکنون دو رابطه توسط ماورودیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) و چیوکارلی و ایرولینو (۲۰۱۰) برای پیش‌بینی پریود پالس‌های سرعت به ازای بزرگای گشتاوری مختلف در حوزه نزدیک گسل (با بهره‌گیری از رکوردهای واقعی ثبت شده) ارائه شده است که در شکل‌های ۶ و ۷ نتایج دو رابطه مشابه به دست آمده در این پژوهش با آن‌ها مقایسه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ ملاحظه می‌شود، در تمامی مدل‌ها روند مشابهی وجود دارد؛ بدین معنا که با افزایش بزرگای گشتاوری زلزله‌ها طول پالس سرعت بلندتر خواهد شد، اما در بزرگای متفاوت نتایج مختلفی به دست آمده است. این اختلاف به خصوص در زلزله‌های با بزرگای بالا نمود بیشتری دارد. به نظر می‌رسد اصلی‌ترین علت این تفاوت، محدودیت تعداد رکوردهای واقعی موجود قابل بررسی است که باعث شده است روابط بر مبنای

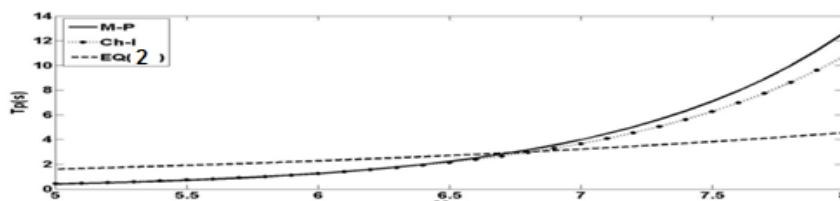
کند، تفاوت در انتخاب محدوده‌ای از رکورد است که به‌عنوان پالس پرئودبلند در نظر گرفته می‌شود. چنان‌که همان‌طور که واضح است روابط ماورودیس و پاپا جورجیو و چیوکارلی و ایرولینو نیز دارای اختلافاتی هستند.

۲.۳.۴. روابط مربوط به PGV

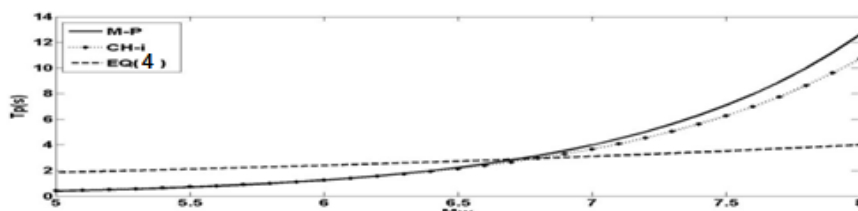
بر همین منوال چهار رابطه (۶)، (۷)، (۸) و (۹) برای محاسبه PGV پالس پرئودبلند استخراج شده است:

- (۶) (لغزش ثابت) $\text{Log(PGV)} = 0.327M_w - 0.8481$
- (۷) (لغزش ثابت) $\text{Log(PGV)} = -7.8 + 2.64M_w - 0.183 (M_w^2) + (-3.5 + 0.46 M_w) \log_{10}((R_{jb}^2 + 1.3^2)^{1/2})$
- (۸) (لغزش متغیر) $\text{Log(PGV)} = 0.214M_w - 0.0425$
- (۹) (لغزش متغیر) $\text{Log(PGV)} = -2.88 + 1.2M_w - 0.08 (M_w^2) + (-3.01 + 0.4 M_w) \log_{10}((R_{jb}^2 + 1.1^2)^{1/2})$

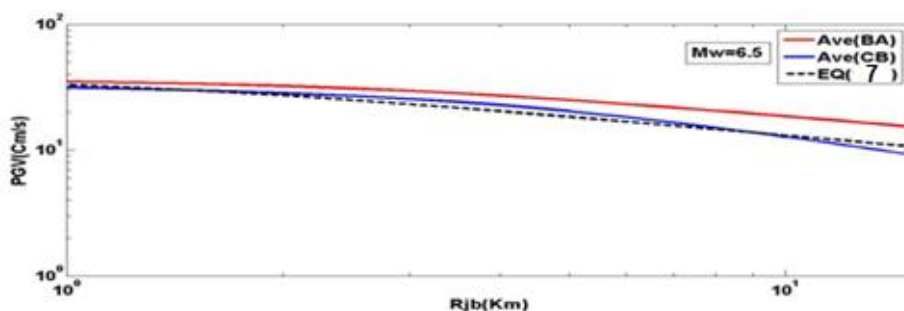
از آنچه برای زلزله‌های با بزرگای مشابه پیش‌بینی می‌شود، ثبت کرده‌اند. درنهایت رکورد حاصل از زلزله مورگان‌هیل (۱۹۸۴) با بزرگای ۶/۱ نیز زمان کوتاه‌تری از مقدار پیش‌بینی شده از رابطه داشته است. در تمام این موارد نتایج به روابط حاصل از این پژوهش نزدیک‌ترند. ماورودیس و پاپاجورجیو، این اختلافات را ناشی از علت‌هایی چون تفاوت‌های ساختاری زلزله‌های درون‌صفحه‌ای و میان‌صفحه‌ای، تأثیرات امواج تبدیلی چون SP، فرایند پیچیده گسیختگی و تغییر مکان ماندگار می‌دانند. دلیل دیگری که ممکن است این اختلافات را توجیه



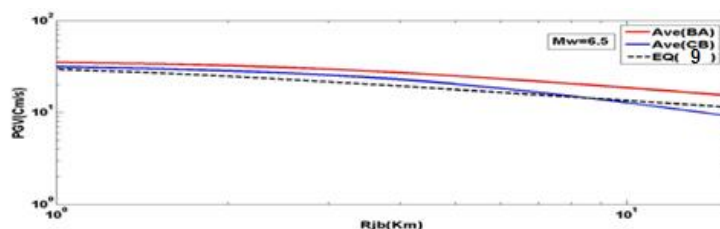
شکل ۶. مقایسه روابط محاسبه‌شده برای پرئود پالس با در نظر گرفتن توزیع لغزش ثابت با روابط ماورودیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) و چیوکارلی و ایرولینو (۲۰۱۰).



شکل ۷. مقایسه روابط محاسبه‌شده برای پرئود پالس با در نظر گرفتن توزیع لغزش متغیر با روابط ماورودیس و پاپاجورجیو (۲۰۰۳) و چیوکارلی و ایرولینو (۲۰۱۰).



شکل ۸. مقایسه میانگین مقادیر روابط کاهندگی با نتایج به‌دست‌آمده از روابط PGV برای توزیع لغزش ثابت.



شکل ۹. مقایسه میانگین مقادیر روابط کاهندگی با نتایج به‌دست‌آمده از رابطه PGV برای توزیع لغزش متغیر.

واقعی در دنیا، پالس‌های حاصل از جنبش نیرومند زمین را شبیه‌سازی کند. در ادامه برای ایجاد یک شبکه گسترده داده‌ای، شرایط بسیار متنوعی برای زلزله‌های فرضی جهت شبیه‌سازی در نظر گرفته شد.

اما از نظر مهندس طراح سازه، مدل‌ها و روش‌هایی قابل توجه هستند که پارامترهای اساسی کنترل‌کننده واکنش‌های الاستیک و غیرالاستیک سازه از جمله دامنه و فرکانس غالب پالس را تولید کنند. برای دستیابی به این پارامترها پالس‌های شبیه‌سازی شده با مدل ریاضی مناسب تطبیق داده شده است. ضریب همبستگی بیش از ۸۷ درصد تمامی پالس‌های شبیه‌سازی شده با مدل ریاضی مذکور، می‌تواند پارامترهای مؤثر در تجزیه و تحلیل سازه‌ای را با اطمینان ارائه دهد. در نتیجه مشخص شد که با توجه به کمبود رکوردهای حوزه نزدیک گسل می‌توان با شبیه‌سازی پالس‌های جنبش زمین و پردازش داده‌ای آن‌ها، پارامترهای اساسی و مؤثر بر سازه‌ها در حوزه نزدیک گسل را استخراج کرد و از آن‌ها در ارائه روابط آماری کالیبراسیون برای پالس پرریودبلند بهره جست.

مراجع

زعفرانی، ح.، نورزاد، ا. و برگگی، خ.، ۱۳۸۶، شبیه‌سازی حرکات ثبت شده در زلزله دی‌ماه ۱۳۸۲، به روش تصادفی گسل با ابعاد محدود و بررسی کمی نقش چشمه لرزه‌زا در شکل‌گیری توزیع خرابی مشاهده شده، نشریه دانشکده فنی، ۴۱(۶)، ۷۵۳-۷۶۴.

برای صحت‌سنجی روابط مربوط به سرعت پالس، در شکل‌های ۸ و ۹ نتایج حاصل از دو رابطه مشابه مربوط به توزیع لغزش ثابت و متغیر با روابط کاهندگی بور و اتکینسون و کمپبل و بزرگ‌نیا، برای زلزله فرضی با بزرگای گشتاوری ۶/۵ مقایسه شده‌اند.

دلیل افت نسبی مقادیر PGV در محاسبات با توزیع لغزش متغیر واضح است؛ چراکه در این حالت مقادیر PGV در نواحی نزدیک کانون زلزله به مراتب بیشتر از نواحی دیگر است و هرچه از کانون گسیختگی دور شویم، این مقادیر کاهش نشان می‌دهند.

همان‌طور که پیش‌تر هم اشاره کردیم، تاکنون محدودیت تعداد رکوردهای واقعی حوزه نزدیک گسل مانع از ارائه روابط آماری کالیبراسیون و دقیق برای تخمین پارامترهای مؤثر پالس پرریودبلند شده است، اما در این پژوهش با در اختیار داشتن طیف وسیعی از رکوردهای شبیه‌سازی شده (حدود ۳۴۰۰ رکورد) می‌توان امیدوار بود که روابط به‌دست‌آمده از دقت و کارایی کافی برخوردار باشند.

۵. نتیجه‌گیری

در ابتدا با توجه به اهمیت جنبش زمین در حوزه نزدیک گسل و آثار ناشی از آن بر سازه‌های مهندسی، از یک روش شبیه‌سازی تعینی برای شبیه‌سازی پالس‌های جنبش نیرومند زمین در حوزه نزدیک گسل استفاده شده است. مطالعات قبلی نشان داده است که این روش می‌تواند به‌خوبی و با درصد تطابق بالا در مقایسه با رکوردهای

Akkar, S. and Bommer, J. J., 2010, Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East, *Seismol, Res. Lett.*, 81, 195-206.

Ameri, G., Emolo, A., Pacor, F. and Galovic F., 2011, Ground motion simulations for the 1980 M 6.9 Earthquake (Southern Italy) and Scenario Events, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 101(3), 1136-1151.

- Ameri, G., Gallovic, F., Pacor, F., Emolo, A., 2009, Uncertainties in strong ground-motion prediction with finite-fault synthetic seismograms: an application to the 1984 M 5.7 Gubbio, Central Italy, *Earthquake, Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2A), 647-663.
- Bertero, V. V., Mahin, S. A. and Herrera, R. A., 1978, Aseismic design implications of near-fault San Fernando earthquake records, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*, 6, 31-42.
- Boore, D. M. and Atkinson, G. M., 2008, Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s, *Earthq. Spectra*, 24, 99-138.
- Boore, D. M. and Joyner, W. B., 1997, Site amplification for generic rock sites, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87, 327-341.
- Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y., 2008, NGA ground motion model for the geometric mean horizontal component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 s, *Earthq. Spectra*, 24, 139-172.
- Chioccarelli, E., and Iervolino, I., 2010, Near-source seismic demand and pulse-like records: a discussion for L'Aquila earthquake, *Earthquake Engng Struct. Dyn.*, 39, 1039-1062.
- Cultrera, G., Cirella, A., Spagnuolo, E., Herrero, A., Tinti, E. and Pacor, F., 2010, Variability of kinematic source parameters and its implication on the choice of the design scenario, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 100(3), 941-953.
- D. Bray, J. and Rodriguez-Marek, A., 2004, Characterization of forward-directivity ground motions in the near-fault region, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 24, 815-828.
- Frankel, A., 2009, A constant stress – drop model for producing broad band synthetic seismograms: comparison with the next generation attenuation relations, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 99(2A), 664-680.
- Galovič, F. and Brokešová, J., 2004, On strong ground motion synthesis with k-2 slip distributions, *J. Seismol.*, 8, 211-224.
- George, P., Apostolos, M., Papageorgiou, S., 2003, A mathematical representation of near-fault ground motions, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 93(3), 1099-1131.
- Halldorsson, B., Olafsson, S. and Sigbjornsson, R., 2007, A fast and efficient simulation of the far-fault and near-fault earthquake ground motions associated with the June 17 and 21, 2000, Earthquakes in South Iceland, *Journal of Earthquake Engineering*, 11, 343-370, 2007 Copyright © A. S. Elnashai & N. N. Ambraseys ISSN: 1363-2469 print / 1559-808X online, DOI: 10.1080/13632460601031631.
- Herrero, A. and Bernard, P., 1994, A kinematic self-similar rupture process for earthquakes, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 1216-1228.
- Hutchings, L., Ioannidou, E., Foxall, W., Voulgaris, N., Savy, J., Kalogeras, I., Scognamiglio, L. and Stavrakakis, G., 2007, A physically based strong ground-motion prediction methodology, application to PSHA and the 1999 Mw~6.0 Athens earthquake, *Geophys. J. Int.*, 168, 659-680.
- Olson, A. H., Orcutt, J. A. and Frazier, G. A., 1984, The discrete wavenumber/finite element method for synthetic seismograms, *Geophysical Journal of Royal Astronomical Society*, 421, 60-77.
- Pitarka, A., Dalguer, L., Day, S., Somerville, P. and Dan, K., 2009, Numerical study of ground-motion differences between buried-rupturing and surface-rupturing earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(3), 1521-1537, doi: 10.1785/0120080193.
- Somerville, P., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N. and Kowada, A., 1999, Characterizing earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80.
- Spudich, P. and Brian, S. and Chiou, J., 2008, Directivity in NGA earthquake ground motions, analysis using Isochrone theory, *Earthquake Spectra*, 24(1), 279-298.
- Spudich, P. and Xu, L., Software, 2002, for calculating earthquake ground motions from finite faults in vertically varying media, In: Lee WHK, Kanamori, H., Jennings, P., Kisslinger, C., editors, *International handbook of earthquake and engineering seismology*, vol. 2. Orlando: Academic Press; 2002.
- Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994, New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 84, 974-1002.
- Zafarani, H., Noorzad, A. and Ansari, A., 2005, Generation of near-fault response spectrum for a large dam in Iran, *Hydropower and Dams*, 12(4), 51-55.
- Zafarani, H., Vahidifard, H. and Ansari, A., 2012, Sensitivity of ground-motion scenarios to earthquake source parameters in the Tehran metropolitan area, Iran, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 43, 342-354.
- Zafarani, H., Vahidifard, H. and Ansari, A., 2013, Prediction of broadband ground-motion time histories: the case of Tehran, Iran, *Earthquake Spectra*, 29(2), 633-660.